

Caracterização Hidrogeológica para o Uso Racional e Proteção dos Mananciais Subterrâneos em Maceió - AL

Manoel de Melo Maia Nobre

*Depto. de Geologia/UFAL e Maia Nobre Engenharia, Av. Dom Antônio Brandão, 333/s.107 a 109
57021-190 Maceió, AL - Telefax (82) 326-3917 - maia@dialnet.com.br*

Rosane Cunha Maia Nobre

*Depto. Águas e Energia/UFAL, Campus A. C. Simões, BR 104, Tabuleiro dos Martins
57072-970 Maceió, AL - Tel. (82) 214-1272 - rosanemaia@uol.com.br*

Recebido: 26/04/00 - revisão: 28/07/00 - aceito: 12/12/00

RESUMO

Com a crescente demanda e escassez de águas de superfície de boa qualidade, a cidade de Maceió tem hoje, a exemplo de outras capitais nordestinas, a maior parte de seu suprimento com origem nos seus mananciais subterrâneos. Este trabalho objetivou, como primeira etapa, a caracterização do comportamento do sistema de aquíferos da região através de um tratamento numérico do fluxo de suas águas subterrâneas. Isto também permitiu a previsão, em caráter preliminar, de interferências causadas por diferentes padrões de extração de água na escala de domínio da Região Metropolitana de Maceió (RMM). Dessa forma, a modelagem tridimensional realizada confirmou a necessidade da utilização de ferramentas objetivas para a gestão adequada dos recursos hídricos subterrâneos de uma região que depende de suas águas para assegurar seu reconhecido potencial turístico. A definição de zonas de captura de poços e identificação de áreas com maiores riscos de contaminação são também importantes produtos deste estudo.

Os resultados obtidos já permitem constatar que o atual sistema de exploração tem causado perturbações significativas no regime de fluxo de águas do sistema de aquíferos Barreiras/Marituba, a exemplo de processos de intrusão marinha já confirmados através da elevação dos teores de cloretos. A avaliação da disponibilidade hídrica na área em estudo, por um lado, e as demandas pelo uso da água na RMM, evidenciaram que o volume total de águas subterrâneas ora extraídas já é superior à recarga. Assim, além de uma regulamentação adequada do uso e proteção dos mananciais subterrâneos da região, que reflete aspectos técnicos tratados neste trabalho, processos de reinjeção de águas pluviais devem ser considerados como uma das alternativas existentes.

Palavras-chave: água subterrânea; proteção; modelo matemático.

INTRODUÇÃO

Os mananciais hídricos subterrâneos são tradicionalmente utilizados como fontes de abastecimento d'água para uso doméstico, industrial ou agrícola. A qualidade de suas águas, aliada à facilidade de extração em locais com escassez de águas de superfície, tem sido um fator importante e decisivo para o desenvolvimento de sistemas de extração em larga escala e de reduzidos custos visando satisfazer, quase sempre, demandas cada vez mais elevadas. Serviços públicos ineficientes, ou muitas vezes inexistentes, podem também contribuir para a busca de soluções mais imediatas e sem o devido controle por parte da comunidade. A qualidade e quantidade das águas subterrâneas, entretanto,

podem ser comprometidas caso a exploração não seja fundamentada em estudos preliminares de planejamento e de uso sustentável dos mananciais. É importante que seja assegurada, às gerações futuras, uma disponibilidade hídrica em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos, bem como a proteção dos mananciais contra fontes poluentes. Cabe ressaltar, ainda, que a recuperação de aquíferos contaminados é complexa, tendo em vista a lenta renovação de suas águas, com velocidades de fluxo extremamente reduzidas, bem como os elevados custos de remediação.

A avaliação integrada de mananciais subterrâneos e bacias hidrográficas se constitui na forma mais adequada na gestão de recursos hídricos de uma região. Isto se torna ainda mais evidente

quando se trata de uma área costeira situada em uma bacia sedimentar onde sistemas estuarinos também podem desempenhar um importante papel. É de conhecimento que os reservatórios de águas subterrâneas se encontram, na maioria dos casos, subjacentes a sistemas de água de superfície, como rios, lagos e reservatórios, podendo estar hidráulicamente conectados aos mesmos. De fato, a gestão integrada de mananciais subterrâneos e de superfície permite uma avaliação das "trocas" hidráulicas entre esses corpos e da qualidade de suas águas. Por exemplo, durante períodos de baixas vazões, a exploração de águas subterrâneas poderá satisfazer as demandas hídricas existentes. É neste período seco que as águas de descarga do aquífero garantem uma vazão regularizada nos rios. Em períodos chuvosos, por outro lado, quantidades em excesso de águas, com origem no escoamento superficial, poderão ser desviadas para poços de injeção ou canais fluviais de forma a recarregar as reservas dos aquíferos menos profundos. A reinjeção de águas doces no subsolo poderá, também, servir como uma alternativa de remediação de aquíferos atingidos pela intrusão da cunha salina devido à exploração excessiva de suas águas, a exemplo do que já está ocorrendo em cidades costeiras como Recife e Maceió.

A gestão dos recursos hídricos subterrâneos deve sempre ser estabelecida com base na avaliação de condições hidrogeológicas específicas bem como de possíveis impactos ambientais associados ao desenvolvimento e implantação de equipamentos de extração para satisfazer demandas múltiplas e usos cada vez mais competitivos de água. De fato, o planejamento só deve ser realizado com base na representação do sistema conceitual físico do domínio, incluindo processos de fluxo e de transporte de massa - poluentes - que ocorrem no meio poroso e/ou fraturado. Assim, a metodologia recomendada neste trabalho inclui a aplicação de modelos numéricos que possibilitam a realização de algumas previsões de comportamento do sistema hídrico subterrâneo na Região Metropolitana de Maceió (RMM).

No Estado de Alagoas, tem-se verificado, nos últimos anos, uma tendência crescente para o aproveitamento das águas provenientes de mananciais subterrâneos, visando o abastecimento urbano e rural. Esta forma de captação já se constitui na principal fonte de abastecimento, numa vasta área compreendida pela bacia sedimentar Alagoas-Sergipe, localizada ao longo do litoral alagoano. A

RMM, em particular, tem hoje cerca de 80% de seu suprimento com origem nos recursos hídricos subterrâneos, fartos e de boa qualidade, através de mais de 400 poços profundos. Esses mananciais hídricos, entretanto, vêm sofrendo um processo contínuo de degradação e diminuição de suas reservas, decorrente da perfuração não controlada de poços tubulares. Isto se deve a uma ocupação desordenada do meio físico e aumento da demanda hídrica, bem como a não regulamentação, até o momento, do regime de outorga de direitos de uso de mananciais hídricos, como estabelece a Lei Estadual de Recursos Hídricos aprovada em 1997. É oportuno lembrar que a descontinuidade do Projeto Pratagy, que certamente teria garantido uma maior disponibilidade de vazão para os bairros da zona norte da cidade, levou a perfuração de uma quantidade ainda maior de poços na área para suprir a demanda crescente.

Vale salientar ainda que as atividades sucro-alcooleiras desenvolvidas na região, com a utilização intensiva de defensivos agrícolas e fertilizantes, a existência de lixões e de tanques enterrados dos postos de combustíveis bem como a falta de saneamento básico adequado na cidade, constituem-se em elementos potenciais de contaminação do sistema Barreiras/Marituba. A possibilidade de compostos orgânicos existentes na composição da gasolina, tais como benzeno, tolueno e xilenos e compostos como bifenilas policloradas (i.e., ascarel) atingirem os aquíferos mais superficiais é uma realidade e isto pode ocorrer pouco tempo após sua infiltração no subsolo. Entretanto, a mitigação desses possíveis impactos ambientais poderá levar dezenas de anos, demandando tecnologias específicas e custos muito elevados.

Alguns esforços já vêm sendo mobilizados pela comunidade técnica local e o governo do Estado de forma a regulamentar a Lei Estadual de Recursos Hídricos. Apesar disso, os aspectos técnicos continuam ainda pouco discutidos ou até mesmo, pouco conhecidos. Uma gestão integrada desses recursos hídricos só será efetiva se baseada em conhecimentos técnicos específicos. Como exemplo, um passo fundamental, para os sistemas de extração de água subterrânea na RMM, diz respeito à delinearção das "zonas de captura" ou "áreas de proteção de poços" (*wellhead protection areas*). No entanto, é oportuno lembrar que o conceito de "zonas de proteção de poços tubulares" é, muitas vezes, erroneamente entendido como sendo simplesmente a "urbanização" - ou proteção sani-

tária - das áreas na superfície imediatamente em torno dos poços. Na verdade, essas zonas de proteção são definidas, na forma técnica e científica, como regiões de contribuição do aquífero cujas águas convergirão para o poço - ou sistema de poços - durante um determinado intervalo de tempo julgado necessário (USEPA, 1987). Assim, processos de contaminação de águas subterrâneas, ou mesmo a existência de fontes poluentes nas áreas de recarga poderão ser, de fato, evitados.

O objetivo deste trabalho é consolidar os resultados preliminares da modelagem numérica do fluxo das águas subterrâneas realizada para a RMM, de forma a dar início a uma avaliação sistemática da questão. Previsões quanto aos riscos de contaminação e processos de intrusão marinha poderão ser avaliadas em etapa posterior, permitindo uma melhor proteção dos mananciais hídricos atualmente explorados. Nesse exercício de modelagem, foram utilizados modelos tridimensionais de fluxo de águas subterrâneas e de rastreamento de partículas, na previsão de cargas potenciométricas e velocidades de fluxo, aplicados a meios heterogêneos, anisotrópicos e saturados. As equações diferenciais parciais obtidas pelo modelo matemático de fluxo, juntamente com as condições de contorno, foram resolvidas numericamente pelo Método das Diferenças Finitas.

ASPECTOS CLIMÁTICOS

A cidade de Maceió está inserida numa região de clima quente e úmido, com regime uniforme de chuvas, marcado por duas estações bem definidas. A estação chuvosa se estende de março a agosto, quando é registrado cerca de 75% da precipitação total anual, que corresponde, em média, a 1876 mm (Souza et al., 1998). A temperatura é homogênea ao longo do ano, com valores médios da ordem de 25°C. Estima-se que a taxa de infiltração na Região Metropolitana de Maceió, na região dos tabuleiros, seja da ordem de 30% do total precipitado (Saldanha et al., 1980). Com a crescente taxa de urbanização e ocupação do solo em Maceió, em particular em áreas de recarga do sistema aquífero subterrâneo, tem-se verificado uma maior "impermeabilização" das zonas de infiltração, dificultando a recarga durante os meses de inverno. Isto implica em uma flutuação menos abrangente do lençol d'água subterrâneo e consequente diminuição da reservas exploráveis do sistema de aquíferos Barreiras/Marituba na RMM.

A rede hidrográfica é caracterizada por pequenas bacias que deságuam na Lagoa Mundaú, a exemplo dos riachos Cardoso e Catolé, ou no oceano Atlântico, como os riachos Reginaldo, Jacarecica e riacho Doce. Os rios são perenes, na maioria, devido à alimentação das águas subterrâneas que afloram nos vales mais profundos, sob a forma de exutórios naturais ou fontes. O escoamento superficial é pouco expressivo, e o regime fluviométrico dessas bacias está diretamente ligado à recarga do escoamento base. A geomorfologia da RMM se encontra ilustrada na Figura 1, incluindo os contornos físicos do Sistema Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba.

GEOLOGIA REGIONAL

A área em estudo situa-se nos domínios da Bacia Sedimentar Alagoas-Sergipe, ocorrendo ao longo de todo o litoral alagoano, e é limitada, à oeste, pela linha da falha principal, no contato com o cristalino (Lima, 1990). Esta falha é grosseiramente paralela à linha litorânea e dela afasta-se cerca de 20 km, conforme a Figura 2. Os sedimentos da Bacia Alagoas-Sergipe assentam-se sobre rochas ígneas e metamórficas, que formam o Complexo do Embasamento, a cerca de 6.000 m de profundidade, e que apresentam estruturas em forma de "horst" e "graben" (Saldanha et al., 1980). A estratigrafia dessa bacia é consequência direta da sua evolução estrutural, sendo o preenchimento sedimentar variável de um compartimento tectônico para outro, configurando várias sub-bacias. Como o soerguimento ou subsidência de cada compartimento processou-se de modo desigual ao longo do tempo, verifica-se uma distribuição espacial complexa das unidades crono e litoestratigráficas (Lana, 1990).

A espessa seção de sedimentos acumulados nesta depressão, na região enfocada, apresenta um mergulho suave e uma grande variação faciológica, definindo, da base para o topo, as formações Coqueiro Seco, Ponta Verde, Muribeca (membros Maceió, Carmópolis e Ibura), Piaçabuçu (membro Marituba) e Barreiras. Estas últimas, mais superficiais, constituem-se nos horizontes com maiores potenciais de fluxo da região em estudo, com espessuras superiores a 200 m, caracterizados pelos aquíferos Barreiras e Barreiras/Marituba. A formação Ponta Verde apresenta-se como uma espessa seção de folhelhos e, desse modo, funciona como um importante aquitarde na região. A geologia de superfície da área pode ser representada pelo mapa

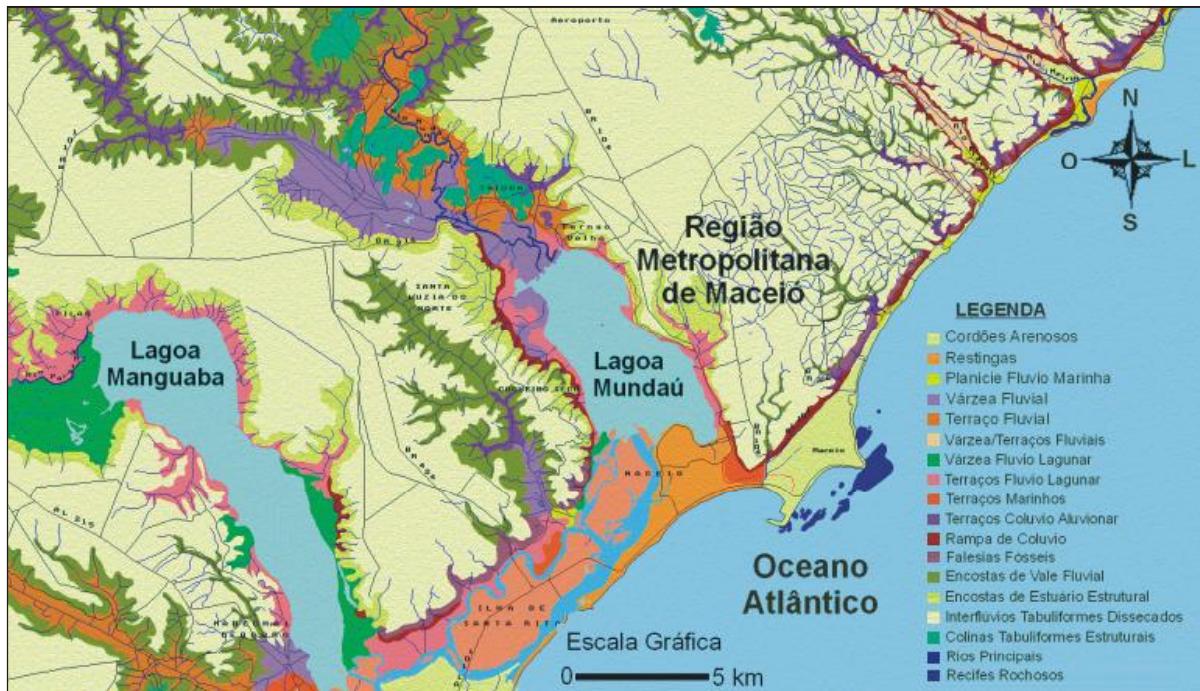


Figura 1. Mapa geomorfológico da RMM com o Sistema Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba (adaptado do GEM/UFAL, 1999).

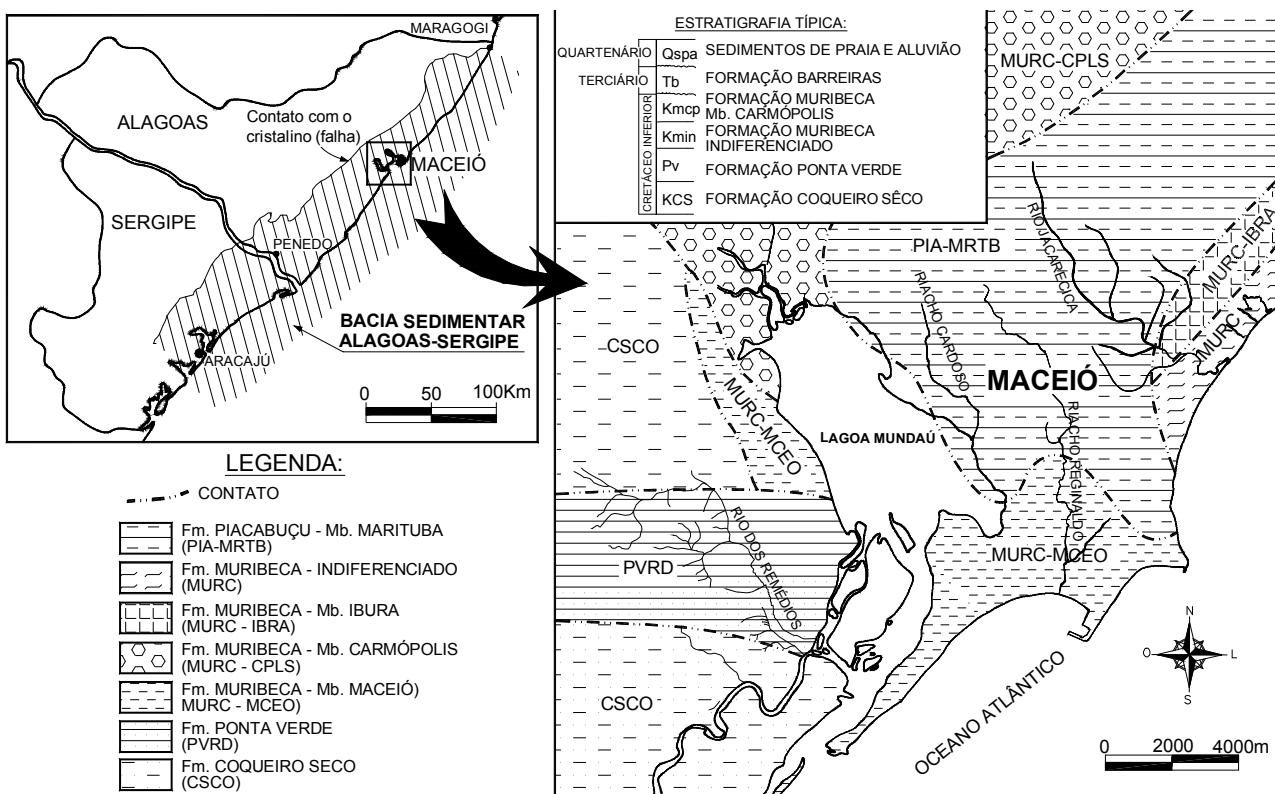


Figura 2. Mapa de sub-afloramentos da discordância pré-Barreiras.

de sub-afloramentos da discordância pré-Barreiras, apresentado na Figura 2 (adaptado de Saldanha et al., 1980).

O grande pacote sedimentar dos tabuleiros corresponde à formação Barreiras, de idade terciária, constituído por rochas clásticas continentais, ou seja, seixos e areias quartzosas de diversos tamanhos, com intercalações de argilas caulínicas e óxidos de ferro (Lima, 1990). A drenagem que "corta" os sedimentos dessa formação, forma, em geral, vales alongados de encostas abruptas (Schaller, 1969) que podem se abrir em compartimentos maiores na região do litoral alagoano, dando origem a extensas lagoas como por exemplo às do Sistema Lagunar Mundaú-Manguaba (Nobre et al., 2000). Cabe ressaltar que a deposição continental da formação Barreiras, extensiva sobre toda a Bacia Sedimentar Alagoas-Sergipe, pode ser considerada um episódio independente, mas ligado a evolução da geomorfologia regional. No mapa de sub-afloramentos da discordância pré-Barreiras da Figura 2, são encontradas as formações relacionadas acima e seus respectivos membros.

SISTEMA DE AQUÍFEROS DA REGIÃO

O sistema de aquíferos explorados na RMM é constituído pela formação Barreiras e pelo membro Marituba da formação Piaçabuçu. Estas apresentam grandes espessuras de arenitos e areias que deram origem a excelentes aquíferos.

Na verdade, os dois horizontes acima funcionam, sob o ponto de vista hidráulico, como um só sistema aquífero. As demais formações do pacote sedimentar apresentam potencialidades menores em termos de transmissibilidade de fluidos. Na região dos tabuleiros, a base da formação Barreiras encontra-se normalmente acima do nível do mar, e o aquífero apresenta-se parcialmente saturado. Nos baixos paleo-topográficos, entretanto, a discordância entre esta formação e as formações cretáceas atingem níveis de até -100 m (Saldanha et al., 1980). Nessas regiões, o aquífero Barreiras apresenta um melhor desempenho, pois seus sedimentos clásticos estão, normalmente, espessos e saturados. Esse aquífero tem comportamento, em geral, livre e espessura homogênea, que pode alcançar até 150 m. Testes de aquífero convencionais realizados nesta formação revelaram valores de condutividade hidráulica que variam entre 10^{-3} a 10^{-2} cm/s e coeficiente de armazenamento da ordem de 0,0001.

O membro Marituba da formação Piaçabuçu, constituído por areias grossas e calcários, ocorre principalmente na região dos tabuleiros. Este membro encontra-se capeado pelos clásticos da formação Barreiras e, por conseguinte, apresenta-se totalmente saturado. O sistema Barreiras/Marituba, formado pelos dois horizontes permeáveis, possui comportamento livre na zona superior e diversos horizontes confinados, com espessura que varia de 30 a 450 metros. As potencialidades hidráulicas verificadas são excelentes, com valores de condutividade hidráulica que variam entre 10^{-3} a 10^{-1} cm/s. A recarga a este sistema aquífero faz-se através da infiltração direta a partir das precipitações, em particular na época de inverno. O membro Carmópolis da formação Muribeca constitui-se em um aquífero com menores potencialidades, composto por conglomerados argilosos na região em estudo (Saldanha et al., 1980).

MODELO REGIONAL DE FLUXO

Modelos computacionais são ferramentas utilizadas para representar uma versão mais simplificada da realidade. Através da modelagem de fluxo de águas subterrâneas, por exemplo, torna-se possível avaliar alternativas de gerenciamento assim como prever os efeitos de medidas adotadas. A fase preliminar do estudo consiste no desenvolvimento do modelo conceitual da questão, onde toda complexidade do meio poroso, com diversas propriedades hidráulicas, é substituída por um meio equivalente composto por camadas tridimensionais distintas, de forma a satisfazer às equações diferenciais parciais de fluxo e as condições de contorno a elas impostas. Desta forma, os modelos só podem ser utilizados como ferramentas determinísticas eficientes quando da disponibilidade de dados de campo suficientes para a adequada calibração dos mesmos, assim como do verdadeiro conhecimento prévio da questão. Caso contrário, o enfoque probabilístico ou estocástico se torna mais adequado (Nobre e Sykes, 1992).

O desenvolvimento e aplicação desses modelos é realizado através de várias etapas sequenciais e interdependentes, e faz uso, normalmente, de uma interface gráfica para o pré e pós processamento dos dados. Enquanto os modelos de simulação podem determinar a resposta hidráulica do fluxo e transporte de contaminantes, considerando interferências como bombeamento ou recarga arti-

ficial, por exemplo, os modelos de otimização, por sua vez, são aplicados na identificação de estratégias operacionais “ideais” para o planejamento integrado dos recursos hídricos. Em processos de gestão, entretanto, esses modelos deverão ser adotados, de forma conjunta, como ferramentas indispensáveis no processo de previsão.

Metodologia utilizada

A modelagem das águas subterrâneas envolve, em sua essência, cinco fases distintas que permitem, de forma sistemática, uma aproximação adequada do sistema real através da elaboração do modelo conceitual. Estas fases incluem a) compilação das informações históricas; b) levantamento dos dados de campo; c) seleção e implementação do modelo; d) calibração e verificação do modelo; e) aplicação. Na fase inicial do desenvolvimento do sistema numérico, dados de bombeamento, amostras de sedimentos, perfis geofísicos, medições de níveis estáticos dos aquíferos, hidrografia e recarga são compilados e analisados, de forma determinística ou estocástica, para determinação dos prováveis parâmetros hidráulicos do sistema. As condições de contorno a serem utilizadas no modelo são definidas conforme a área a ser estudada e os objetivos da simulação. De preferência, as fronteiras laterais do domínio devem constituir-se em elementos hidrográficos naturais (Bear e Verruijt, 1990; Huyakorn e Pinder, 1983). É necessário, ainda, que as fronteiras estejam afastadas da região de interesse específica, de forma que as tensões impostas na parte interna do sistema não atinjam essas fronteiras. Com base nessas informações preliminares, um modelo matemático foi escolhido e aplicado, de forma a representar, da melhor forma possível, as condições hidrogeológicas específicas do modelo conceitual desenvolvido neste trabalho.

Apenas uma parte do total de poços perfurados na RMM foi considerada, na fase de levantamento de dados de campo, tendo em vista a não disponibilidade de dados sobre todos os poços particulares executados na cidade. As simulações numéricas foram realizadas através de modelos tridimensionais de fluxo de águas subterrâneas e de rastreamento de partículas, aplicados a meios heterogêneos, anisotrópicos e saturados. As equações diferenciais parciais obtidas pelo modelo matemático de fluxo, juntamente com as condições de contorno, foram resolvidas numericamente através do Método das Diferenças Finitas. Condições perma-

nentes de fluxo foram assumidas para a resolução das equações diferenciais do modelo matemático.

Os modelos computacionais utilizados neste trabalho foram o MODFLOW (McDonald e Harbaugh, 1988) na simulação do fluxo de água, desenvolvido com o suporte do USGS - *United States Geological Survey* e o MODPATH (Pollock, 1989) na simulação do transporte advectivo de partículas. O pré e pós-processador PM-*Processing Modflow* (Chiang e Kinzelbach, 1994) foi utilizado como interface gráfica. Este modelo concebe o sistema tridimensional como uma sequência de camadas permeáveis, que podem ser assumidas como confinadas, semi-confinadas ou não-confinadas. À camada superior do sistema físico conceitual é normalmente atribuída uma condição de não-confinamento. Os valores de cargas potenciométricas nessa camada superficial são determinados dentro da hipótese de Dupuit. Com isso, o modelo utilizado permite que o nível estático varie indefinidamente até a convergência do sistema numérico.

Modelo matemático

A equação geral que descreve o comportamento físico do fluxo em meios porosos heterogêneos, anisotrópicos e saturados, sob condições transientes, é definida como (p. ex. Bear e Verruijt, 1990):

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (1)$$

onde: h = carga potenciométrica (L); K_{ij} = tensor de condutividade hidráulica saturada do solo (L/T); S_s = coeficiente de armazenamento específico (1/L); t = tempo (T) e x_i representa o sistema de coordenadas cartesianas. Assumindo as direções principais do tensor de condutividade hidráulica coincidentes com os eixos cartesianos x , y e z , a Equação (1) pode ser descrita como:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2)$$

Para as camadas que representam aquíferos confinados, a expressão acima pode ser modificada através da integração da mesma na direção vertical “ z ”. Dessa forma, é obtida uma nova expressão onde as transmissividades do aquífero T_{xx} ($= K_{xx}b$) e T_{yy} ($= K_{yy}b$) substituem os termos de condutividade

hidráulica e o parâmetro S_s é substituído por um parâmetro médio integrado $S (= S_{sb})$ denominado coeficiente de armazenamento, sendo b a espessura do aquífero. Nessa condição, um novo termo deve ser incluído para representar a drenagem através de camadas confinantes. Assim, a Equação (2) se reduz a:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} + L \quad (3)$$

onde: T_{xx} e T_{yy} = transmissividades nas direções x e y (L^2/T); S = coeficiente de armazenamento (L/L) e L = drenagem vertical (L/T). No caso de camadas que representam aquíferos livres, os termos de transmissividade da Equação (3) são substituídos por $T_{xx} = K_{xx}h$ e $T_{yy} = K_{yy}h$, onde h é a espessura da porção saturada da camada. A expressão matemática resultante, com comportamento não-linear, é conhecida como a equação de Boussinesq:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} h \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} + L \quad (4)$$

As zonas de contribuição em torno de poços de bombeamento foram definidas através do MODPATH (Pollock, 1989). Neste caso, as partículas são "introduzidas" no poço e suas trajetórias são rastreadas até atingirem áreas de recarga ou com maiores valores potenciométricos. Estes códigos de simulação de trajetórias de partículas em meios porosos são, em sua maioria, pós-processadores do modelo de fluxo, uma vez que utilizam o campo de velocidades gerado por aquele modelo. Métodos de interpolação, no entanto, são utilizados no cálculo das trajetórias das partículas uma vez que as mesmas se movem em um domínio espacial contínuo ao passo que as velocidades calculadas da resolução da equação de fluxo são conhecidas apenas em pontos discretos. O MODPATH (Pollock, 1989), por exemplo, faz uso do Método Semi-Analítico de Interpolação Linear.

Discretização do domínio

O domínio regional do modelo conceitual compreende uma área de aproximadamente 110 km² e foi discretizado, inicialmente, em células de 100 x 100 m de área, formando a malha regular de diferenças finitas da Figura 3. Tendo em vista o processo de deposição dos sedimentos na bacia

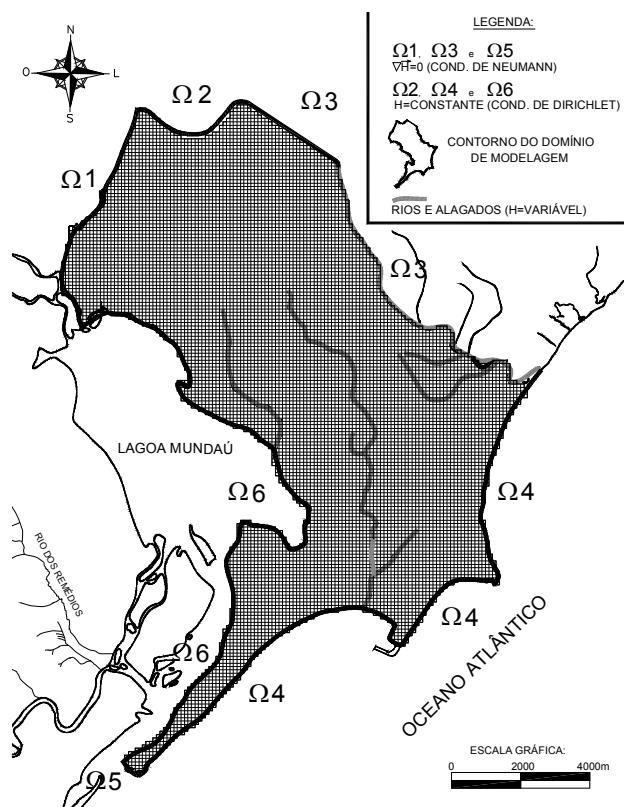


Figura 3. Malha de diferenças finitas e condições de contorno.

Alagoas-Sergipe, é correto assumir o eixo vertical "z" coincidente com uma das direções principais. No plano horizontal, as direções NS-OE da Figura 3 correspondem às direções dos eixos cartesianos "x" e "y" das equações descritas anteriormente. Cabe lembrar que a direção do fluxo de águas subterrâneas em um sistema de aquíferos não é apenas dependente das direções principais do tensor de condutividade hidráulica mas também da distribuição de seus valores no domínio, de coeficientes de armazenamento e das condições de contorno naturais que são impostas ao modelo.

A elaboração da malha só foi processada após a definição do contorno físico do domínio, incluindo elementos geomorfológicos e hidrográficos. Após a implementação das condições de contorno, as células externas se tornaram inativas.

O domínio vertical foi discretizado em três camadas aquíferas, representadas pelo aquífero da formação Barreiras (camada 1), pelo sistema Barreiras/Marituba (camada 2) e pelo aquífero da formação Muribeca (camada 3). Os parâmetros hidrodinâmicos foram obtidos através de testes de aquífero convencionais. Cabe ressaltar, entretanto, que a

realização de testes adicionais bem como a perfuração de novos poços de monitoramento na Região Metropolitana de Maceió possibilitarão calibrações e processos de verificação sempre atualizados do modelo de fluxo.

Condições de contorno

As condições de contorno estão também representadas na Figura 3. O modelo foi alimentado com valores conhecidos de carga hidráulica para as zonas de recarga (Ω_2), bem como fronteiras naturais de contato do domínio, como a orla litorânea (Ω_4), e o contorno leste da lagoa Mundaú (Ω_6), correspondente à condição de contorno do 1º tipo. As fronteiras Ω_1 , Ω_3 e Ω_5 , são coincidentes com linhas de fluxo do sistema e correspondem a uma condição de contorno do 2º tipo. Foram adotadas, nesta fase inicial, as mesmas condições de contorno para as três camadas do domínio. Os riachos Reginaldo, Jacarecica e Cardoso foram simulados através da atribuição de cotas dos níveis aproximados de suas águas.

Implementação do modelo numérico

A Figura 4 destaca a localização dos poços tubulares considerados no modelo, bem como de algumas fontes potenciais de contaminação, representadas de forma discreta, tais como lixões, postos de gasolina e cemitérios. Cabe ressaltar que, na RMM, há um “paliteiro” de sumidouros, por falta de saneamento básico, espalhados por toda a cidade, que podem ser responsáveis, indiretamente, por inúmeras doenças de veiculação hídrica. Estes vetores de contaminação não estão representados na Figura 4, por estarem homogeneousmente e densamente distribuídos na cidade. Verifica-se que muitas das fontes potenciais de contaminação estão inseridas nas zonas de influência dos poços de extração, o que ratifica a necessidade de planejamento do uso e proteção de águas subterrâneas para uma gestão adequada. A recarga ao aquífero processa-se através da infiltração direta a partir das precipitações e, em menor escala, por contribuição dos rios. Foi considerada uma recarga média anual igual a 562 mm, assumindo-se uma taxa de 30% de infiltração. Análises de sensibilidade já estão sendo conduzidas para verificação da resposta do modelo face a diferentes valores de recarga.

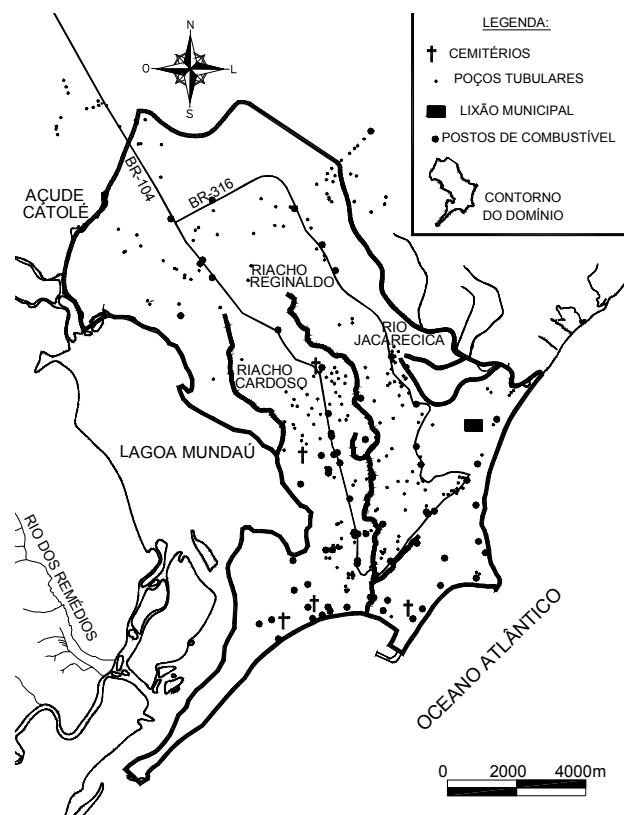


Figura 4. Localização dos poços e de fontes potenciais de poluição na RMM.

O modelo foi alimentado com dados de alguns poços particulares bem como aqueles fornecidos pela Companhia de Abastecimento de Água do Estado - CASAL. Foram assumidos, em alguns casos, dados complementares como níveis topográficos do terreno, localização de filtros e vazões dos poços tubulares, devido a inexistência dos mesmos nos relatórios disponíveis de várias empresas perfuradoras. No total, já foram fornecidos ao modelo, dados de 326 poços, para uma vazão total de extração de aproximadamente $6.700 \text{ m}^3/\text{h}$, o que já representa grande parte do total de águas extraídas de aquíferos em Maceió. Este modelo poderá ser, entretanto, continuamente calibrado a medida que dados de poços adicionais sejam incorporados.

Resultados de simulação

A simulação do modelo de fluxo, sob regime permanente, tem como resultados as Figuras 5 a 8. A potociometria e a distribuição dos vetores de velocidade para as camadas 1 e 2 são apresentadas, respectivamente, nas Figuras 5 e 6, correspondentes a fase de calibração. Verifica-se, naquelas ilustra-

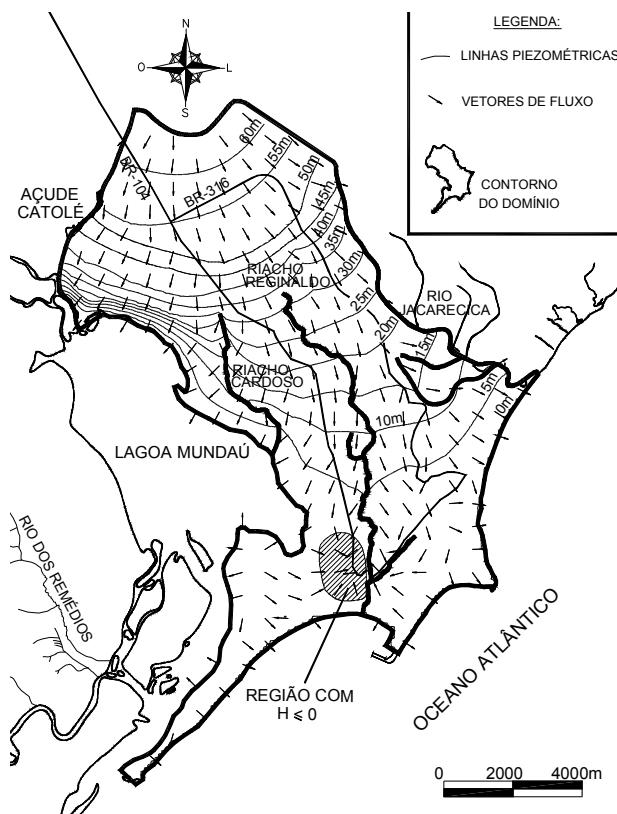


Figura 5. Pontociometria do sistema de aquíferos Barreiras/Marituba (camada1).

ções, que as águas subterrâneas têm como zonas de descarga mais próximas a Lagoa Mundaú, os riachos internos da RMM e o Oceano Atlântico. Os tabuleiros, na porção norte da RMM, representam a zona de recarga mais importante da região, onde são verificadas velocidades mais elevadas para o aquífero freático, da ordem de 750 m/ano. A velocidade média do sistema, entretanto, foi estimada em 56 m/ano, para o sistema Barreiras/Marituba, com gradiente hidráulico de aproximadamente 0,5%.

A Figura 7 apresenta as projeções horizontais das zonas de captura resultantes para uma período de 15 anos, para as baterias de poços dos bairros: Farol (Praça Gonçalves Ledo); Bebedouro; Cruz das Almas e Serraria. Verifica-se que, para os poços localizados nas áreas mais próximas das zonas de recarga (tabuleiros), por exemplo, as zonas de captura são maiores, tendo em vista velocidades de fluxo mais elevadas. Assim, qualquer processo de contaminação nessas regiões poderá atingir os poços mais rapidamente. Nas partes mais baixas, por outro lado, as zonas de captura são menos expressivas, fazendo com uma eventual

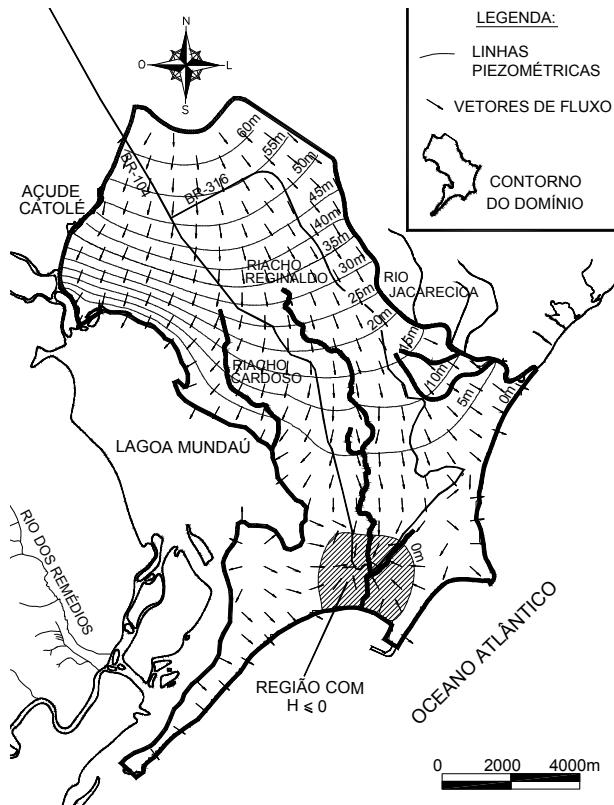


Figura 6. Potociometria do sistema de aquíferos Barreiras/Marituba (camada 2).

contaminação se desloque mais lentamente em direção às zonas de contribuição de poços. Um estudo mais específico de delineação de zonas de captura e definição das zonas de proteção de poços já está sendo desenvolvido para as baterias de poços na RMM, onde são aplicados alguns modelos analíticos (p. ex. Faybishenko et al., 1995; Grubb, 1993). Fatores como posição da seção filtrante (poços parcialmente ou totalmente penetrantes), taxas de bombeamento, gradiente hidráulico regional, anisotropia e heterogeneidade são determinantes no tratamento e definição das zonas de captura de poços de extração, seja para programas de proteção de poços ou mesmo para remediação de aquíferos (Nobre et al., 1999).

A Figura 8 ilustra os resultados de uma das simulações realizadas, ainda na fase de calibração, destacando duas seções verticais que interceptam o domínio através da bateria de poços localizada na praça Gonçalves Ledo e Ladeira do Brito, no bairro do Farol. Para uma vazão total média em torno de 0,09 m³/s (318 m³/h), verifica-se, através das Figuras 5 e 6, que a cota do nível dinâmico do lençol, em pontos específicos, é igual a zero (se iguala à do

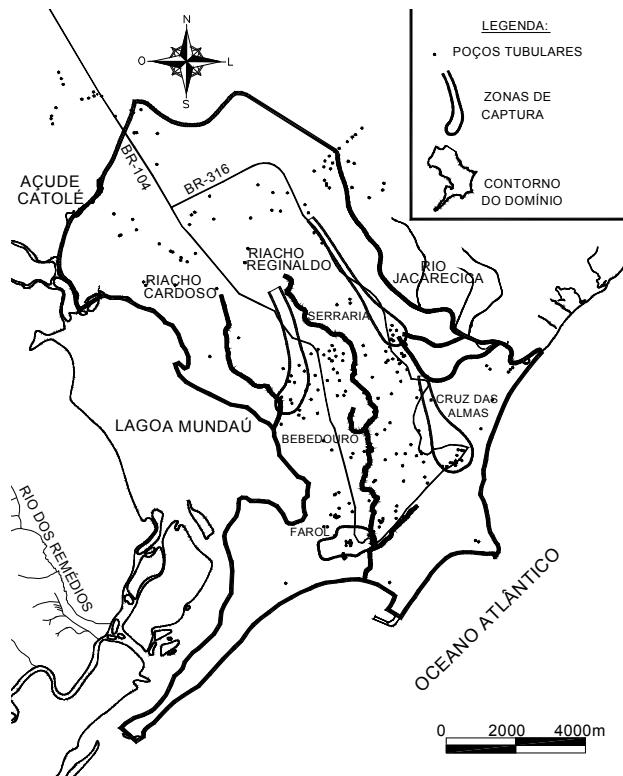


Figura 7. Zonas de captura em baterias de poços da RMM para um período de 15 anos.

nível do mar). Portanto, o gradiente hidráulico é nulo na direção sul, facilitando a ocorrência de processos de intrusão marinha, em algumas partes do domínio. Nas demais regiões, não são verificadas alterações significativas na potenciometria tendo em vista que as vazões do modelo são ainda inferiores às existentes na condição atual de exploração.

BALANÇO HÍDRICO

As reservas periódicas do sistema de aquíferos Barreiras/Marituba da RMM são formadas a partir da infiltração direta das precipitações nas zonas de recarga da bacia sedimentar. Estas reservas podem ser também obtidas através do estudo da flutuação média anual do nível do lençol freático. O volume de águas extraídas para múltiplos usos, ou seja, as reservas exploráveis do aquífero, deve ser, sempre que possível, inferior ou igual às reservas periódicas. Assim, as reservas permanentes do sistema não são utilizadas, evitando problemas como subsidências e recalques diferenciais, além do esgotamento das águas do aquífero. Neste

trabalho, foi realizada uma estimativa preliminar do balanço hídrico na região com dados disponíveis até o momento.

Considerando, como recarga do aquífero, um valor igual a 30% da precipitação total anual de 1876 mm (Souza et al., 1998), temos um valor infiltrado igual a 562 mm/ano. Para uma área total de recarga igual a aproximadamente 200 km² - que corresponde a área do domínio da RMM adotada no modelo, somada à área do tabuleiro à montante daquela região, limitada pela falha da Bacia Sedimentar - o volume total infiltrado com origem nas precipitações é igual a 307.945 m³/dia. Considerando, ainda, que a urbanização na região metropolitana vem reduzindo a infiltração para cerca de 20% do total anual, como estimativa preliminar, temos um volume de recarga efetivo igual a 205.589 m³/dia.

O consumo de água na Região Metropolitana de Maceió foi estimado com base na avaliação dos dados fornecidos pela Companhia de Abastecimento de Água de Alagoas - CASAL. A vazão total e contínua extraída dos poços tubulares daquela companhia é igual a 1,70 m³/s, sendo 0,5 m³/s com origem na bateria de poços do Reginaldo, 0,50 m³/s da área do Bebedouro e 0,70 m³/s dos demais poços isolados, de acordo com informações da própria CASAL. Este valor corresponde a 76% do volume total de águas produzidas pela companhia, igual a 2,20 m³/s, incluindo águas de superfície e águas subterrâneas. Considerando que Maceió deve possuir, ainda, cerca de 200 poços particulares espalhados pela cidade, e estimando uma vazão total de extração desses poços igual a 0,8 m³/s, temos, então, uma vazão total de extração do sistema de aquíferos da RMM igual a 2,50 m³/s ou 216.000 m³/dia. Com isso, estima-se que 82% da água total consumida na RMM provém dos mananciais hídricos subterrâneos.

Conforme os resultados do exercício realizado, verifica-se que a vazão total de produção através de poços tubulares, na Região Metropolitana de Maceió, já é superior a recarga. Isto significa que, em algumas áreas, tanto a reserva explorável quanto a reserva permanente já está sendo utilizada para fins de abastecimento. Isto justifica o fenômeno de salinização que já tem sido verificado em alguns poços na cidade, incluindo alguns afastados da orla marítima.

Para uma vazão total de extração de águas subterrâneas igual a 2,50 m³/s, tem-se um valor

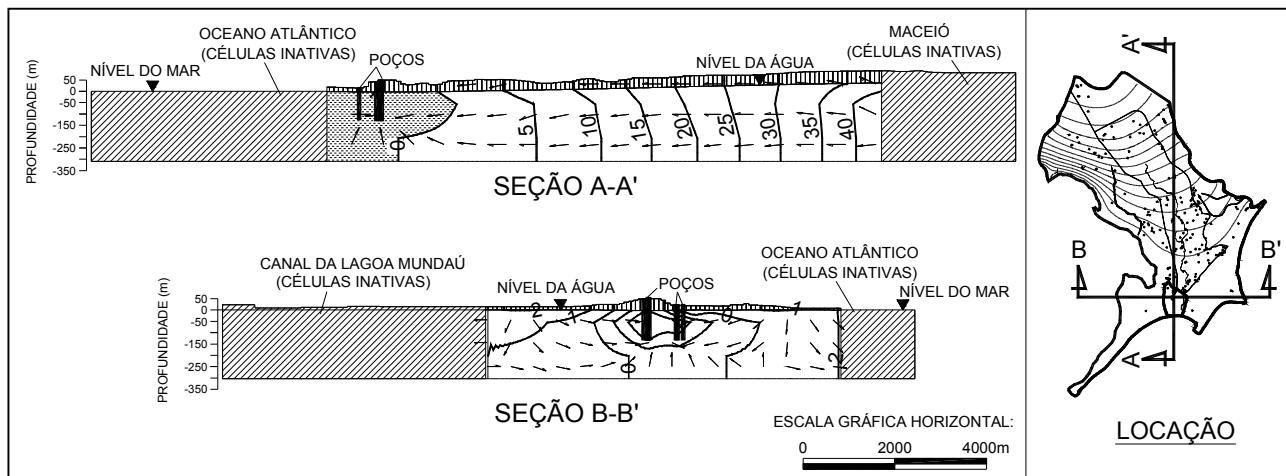


Figura 8. Seções verticais do domínio: potenciometria e vetores de velocidade.

aproximado de $3,0 \text{ m}^3/\text{s}$ de vazão total produzida na RMM, incluindo os poços da CASAL, poços particulares, bem como águas de superfície (reservatórios do Catolé e Aviação). Considerando perdas da ordem de 50%, devido à manutenção precária da rede, tem-se, como vazão total efetiva, ou seja, aquela efetivamente utilizada pela população, um valor igual a $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ou $129.600 \text{ m}^3/\text{dia}$. Isto implica em um consumo efetivo per capita, em Maceió, igual a 168 l/hab/dia , considerando uma população igual a 770.000 habitantes.

PROCESSOS DE INTRUSÃO MARINHA

O estudo e conhecimento das relações entre água doce e água salgada em regiões costeiras são revestidos de grande interesse tendo em vista que muitos aquíferos nessas áreas constituem-se em mananciais estratégicos para abastecimento futuro de água para as diversas atividades humanas. De fato, a perda de qualidade desses mananciais, em função do incremento dos teores de cloreto provocado por falta de um gerenciamento adequado, é muito comum em regiões costeiras. O fluxo de água doce, em condições naturais, encontra-se normalmente em estado de equilíbrio onde o oceano se constitui na zona preferencial de descarga hidráulica. Este equilíbrio só é alterado quando ocorrem mudanças climáticas ou interferências externas.

No caso em estudo, com o bombeamento elevado na faixa litorânea na cidade de Maceió, a zona de captura do sistema de poços deve já ter atingido, em algumas áreas, a interface de água doce/salgada, conforme exemplificado na ilustra-

ção da Figura 9. A verificação de águas com elevado teor de cloreto em diversos poços tubulares na faixa costeira e até mesmo em muitos poços construídos em bairros mais afastados do litoral - Farol, ratifica a ocorrência de processos de intrusão marinha. É necessário, então, que sejam estabelecidas as condições de exploração para que tal ascensão de sal não afete as captações. Além do mais, a impermeabilização das zonas de infiltração na cidade e obras de engenharia estão também contribuindo para uma modificação das relações naturais entre águas doces e águas salgadas.

O avanço indesejável da cunha salina pode ser limitado através de obras de engenharia como implementação de barreiras físicas, hidráulicas (recarga artificial), ou a relocação dos centros de bombeamento (Custódio e Llamas, 1983; Munevar e Mariño, 1999). Cada um desses métodos tem características funcionais próprias para circunstâncias específicas. No caso específico de Maceió, qualquer medida corretiva a ser adotada deve ser fundamentada no conhecimento preliminar dos atuais volumes da captação, bem como a qualidade das águas desses poços, para diferentes profundidades, determinada através de métodos analíticos. A reinjeção de águas em condições similares na formação Barreiras, através de poços tubulares, já foi descrito por Nobre et al. (1998).

Modelos numéricos adicionais estão sendo considerados para a simulação dos efeitos de processos de intrusão marinha, como é tratado, por exemplo, em Robinson e Gallagher (1999), tendo em vista que o modelo de fluxo adotado neste trabalho não leva em consideração os efeitos da variação de densidade do fluido. O estudo de processos

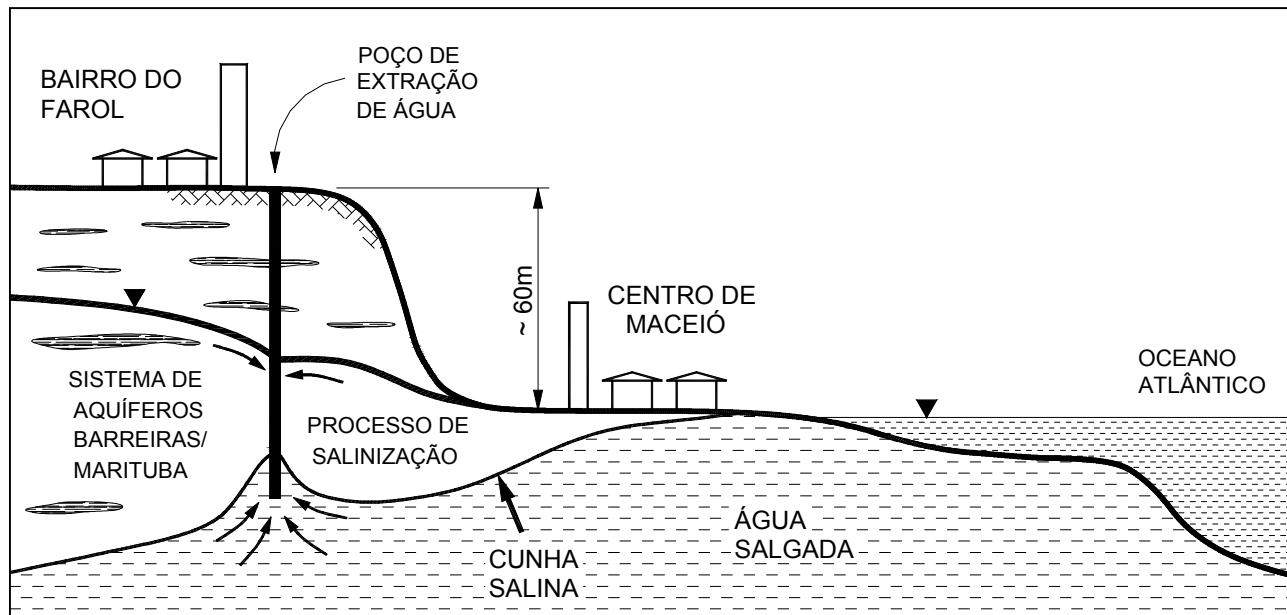


Figura 9. Processo esquemático de intrusão marinha em Maceió.

de reinjeção de águas sob condições não-isotérmicas (p. ex. Nobre e Thomson, 1993) é também necessário nesse tipo de tratamento. Com isso, é possível definir as estratégias de gestão do sistema de aquíferos de Maceió, estabelecendo, assim, os critérios de exploração aceitável de todo seu domínio.

CONCLUSÕES

A modelagem do fluxo de águas subterrâneas e do rastreamento de partículas evidenciaram a importância da utilização dessas “ferramentas” numéricas na previsão daqueles fenômenos em meios porosos com o objetivo de um gerenciamento otimizado dos recursos hídricos na Região Metropolitana de Maceió. Neste trabalho, foi concebido um modelo numérico preliminar da área em estudo que poderá ser bastante útil na previsão do comportamento do manancial hídrico subterrâneo, face a possíveis configurações de bombeamento. Assim, foi iniciada, de forma pioneira, uma avaliação sistêmica da questão dos recursos hídricos na RMM. Análises de sensibilidade do modelo implementando, bem como o refinamento da malha numérica, poderão ser conduzidos numa segunda etapa do trabalho, quando da obtenção de maior quantidade de dados que deveriam ser de domínio público, face aos interesses que a comunidade deve ter sobre o assunto.

Com base nos resultados de simulação, utilizando-se uma parte do total de poços tubulares existentes na cidade, foi verificado que o sistema de aquíferos explorado na região já está sofrendo alterações significativas do ponto de vista hidráulico e qualitativo. Um total aproximado de $2,50 \text{ m}^3/\text{s}$ de águas são extraídas continuamente e corresponde a cerca de 82% do suprimento de água em Maceió. O balanço hídrico anual realizado revelou que este volume total é superior a recarga anual, considerando-se uma área de 200 km^2 . Com perdas da ordem de 50%, calcula-se um consumo efetivo per capita, em Maceió, igual a 168 l/hab/dia . Assim, é imperativo que o regime de outorga de direitos de uso das águas subterrâneas, através da Política Estadual de Recursos Hídricos, seja regulamentado o quanto antes, possibilitando uma gestão mais otimizada e o uso sustentável dos mananciais hídricos. Esta regulamentação, porém, deverá refletir conhecimentos técnicos específicos da área de estudo, a exemplo do que foi tratado neste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - e à CASAL pelas informações fornecidas.

REFERÊNCIAS

- BEAR, J. & VERRUIJT, A. (1990). *Modeling Groundwater Flow and Pollution*. Reidel Publishing Company, Holland, p. 414.
- CHIANG, W. H. & KINZELBACH, W. (1994). *PM-Processing Modflow*. Pre - and Postprocessors for use of MODFLOW, MODPATH e MT3D. Hamburg, Heidelberg, p. 93.
- CUSTÓDIO, E. & LLAMAS, M. R. (1983). *Hidrologia Subterrânea*, Omega Editores, v. 2, p. 2308.
- FAYBISHENKO, B. A.; JAVANDEL, I. & WITHERSPOON, P. A. (1995). Hydrodynamics of the capture zone of a partially penetrating well in a confined aquifer. *Water Resources Research*, v. 31, n° 4, p. 859-66.
- GEM/UFAL (1999). *Mapa geomorfológico digital da Região Metropolitana de Maceió*, disponível pelo Laboratório de Geoprocessamento do Depto. de Geografia e Meio Ambiente da Universidade Federal de Alagoas.
- GRUBB, S. (1993). Analytical model for estimation of steady-state capture zones of pumping wells in confined and unconfined aquifers. *Ground Water*, v. 31, n° 1, p. 27-32.
- HUYAKORN, P. S. & PINDER, G. F. (1983). *Computational Methods in Subsurface Flow*. Academic Press, Inc., London, p. 473.
- LANA, M. C. (1990). Bacia de Sergipe-Alagoas: Uma hipótese de evolução tectono-sedimentar. In: *Origem e Evolução de Bacias Sedimentares*. Petrobrás, p. 415.
- LIMA, I. F. (1990). *Maceió, a Cidade Restinga - Contribuição ao Estudo Geomorfológico do litoral alagoano*. EDUFAL, p. 255.
- McDONALD, M. C. & HARBAUGH, A. W. (1988). *MODFLOW - A Modular Three-dimensional Finite Difference Groundwater Flow Model*. Open-File Report, Book 6, U. S. Geological Survey, Reston, VA, p. 83-875.
- MUNEVAR, A. & MARIÑO, M. A. (1999). Modeling analysis of groundwater recharge potential on alluvial fans using limited data. *Ground water*, v. 37, n° 5, p. 649-59.
- NOBRE, M. M. M. & SYKES, J. (1992). Sensitivity analysis of clay liners. *Water Science and Technology*, Pergamon Press, v. 24, n° 11.
- NOBRE, R. C. M. & THOMSON, N. R. (1993). The effects of transient temperature gradients on soil moisture dynamics. *Journal of Hydrology*, 152, p. 57-101.
- NOBRE, M. M. M.; NOBRE, R. C. M. & DANTAS, J. A. (1998). Utilização de técnicas não convencionais na remediação de solos e águas subterrâneas subjacentes a um polo industrial. *XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos*. ABMS/ABGE, Brasília, DF, 06-10 novembro, p. 1731-38.
- NOBRE, M. M. M.; NOBRE, R. C. M. & SANTOS, P. P. (1999). Soil and groundwater remediation program at Camaçari Petrochemical Complex. *4º Congresso Brasileiro de Geotecnica Ambiental*. ABMS/ABGE, São José dos Campos, SP, 01-05 dezembro, p. 472-484.
- NOBRE, R. C. M.; NOBRE, M. M. M. & FILHO, O. C. R. (2000). Modelo de circulação hidrodinâmica aplicado ao Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba. *1º Congresso sobre Aproveitamento e Gestão de Recursos Hídricos em Países de Idioma Português*. ABES/ABRH. Rio de Janeiro, 17-20 abril, p. 304-313.
- POLLOCK, D. W. (1989). *MODPATH - A computer program to complete and display pathlines using results from MODFLOW*. Open-File Report, U. S. Geological Survey, Reston, VA, p. 89-381.
- ROBINSON, M. A. & GALLAGHER, D. L. (1999). A model of groundwater discharge from an unconfined coastal aquifer. *Ground water*, v. 37, n° 1, p. 80-7.
- SALDANHA, L. A. R.; CAVALCANTE, A. T.; WANDERLEY, P. R. M. & ROCHA, F. C. (1980). Contribuição da geologia na qualificação de áreas para fins hidrogeológicos em Alagoas. *1º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas - ABAS*. Recife, PE, p. 223-31.
- SOUZA, J. L.; ANJOS, F. A.; FILHO, G. M. & MEIRA, P. R. (1998). Característica pluviométrica representativa do tabuleiro costeiro de Alagoas - Período 1972-1996. *X Congresso Brasileiro de Meteorologia*, Brasília, DF.
- SCHALLER, H. (1969). Revisão Estratigráfica da Bacia de Sergipe - Alagoas. *Boletim Técnico da Petrobrás*, 12 (1), p. 21-86.
- USEPA (1987). *Guidelines for Delineation of Wellhead Protection Areas*. EPA 440/6-87-010.

Numerical Evaluation for Sustainable Groundwater Use in the City of Maceió - State of Alagoas, Brazil

ABSTRACT

The development and application of numerical methods to understand surface and groundwater flow regimes constitute important tools for the management of water resources systems. A 3D groundwater flow model was applied to the aquifer system underlying the city of Maceió, with the primary objective of evaluating the regional groundwater dynamics and predicting the system response to different pumping schemes and artificial recharge. Capture zones of production wells were also delineated for specific areas, making it possible to identify areas more highly subject to groundwater contamination with a risk to public health.

In the Metropolitan Area of Maceió, groundwater is used to supply approximately 80% of municipal

water demands. Surface water of good quality is almost nonexistent in this region. On the other hand, no permits for groundwater use are provided as yet and the indiscriminate drilling of wells is not questioned by local authorities. This has been carried out by the community without proper planning or technical evaluation of the groundwater resources.

Groundwater flow modeling, in this preliminary phase, has already shown that the existing groundwater supply system, with over 400 production wells, has caused excessive disturbance in the groundwater flow regime. Saltwater intrusion, for instance, is a consequence of overpumping, and its effects have already been noted by the population at specific sites. The evaluation of water availability and demand indicated that the total amount of water extracted is already greater than aquifer recharge by rainfall and infiltration. Therefore, specific management studies are needed for the area in order to minimize interference effects between wells in the system, land subsidence, saltwater intrusion and problems related to contaminated water in the Metropolitan Area of Maceió.

Key-words: groundwater; protection; mathematical model.